

На правах рукописи

Шкаликов Андрей Викторович

**ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПРИМЕСНЫХ КРИСТАЛЛОВ
НА ОСНОВЕ ЯВЛЕНИЙ ФОТОННОГО ЭХА И
ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА**

(01.04.05 – оптика)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

КАЗАНЬ – 2008 г.

Работа выполнена в лаборатории нелинейной оптики Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Виталий Владимирович Самарцев

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Александр Николаевич Пенин

доктор физико-математических наук, профессор
Сергей Владимирович Сазонов

Ведущая организация: Казанский государственный технический
университет им. А. Н. Туполева, г. Казань,

Защита состоится “ 5 ” июня 2008г. в 14³⁰ часов на заседании Диссертационного Совета Д 212.081.07 в Казанском государственном университете им. В.И. Ульянова-Ленина по адресу: 420008, г.Казань, ул. Кремлевская, д.18.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского Казанского государственного университета.

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2008г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Д.И. Камалова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Данная диссертация посвящена экспериментальному исследованию новых режимов оптической спектроскопии примесных кристаллов. В основе этих режимов лежат явления фотонного эха (включая некогерентное) и параметрического рассеяния света. Общим, объединяющим свойством этих режимов является переход от частотных измерений исследуемых оптических спектров к временным. Разработка новых режимов оптической спектроскопии, безусловно, актуальна. Так, выяснение новых возможностей модуляционной оптической эхо-спектроскопии является важным вкладом в когерентную спектроскопию примесных кристаллов, а экспериментальное исследование некогерентного фотонного эха и его применение в оптической спектроскопии позволит, в перспективе, исследовать быстропротекающие и случайные процессы в примесных кристаллах без использования дорогостоящей фемтосекундной и пикосекундной лазерной техники. К тому же активное использование в этих исследованиях оптических волокон представляется ценным для дальнейших сопряжений оптических эхо-процессоров с оптическими волоконными линиями. Наконец, разрабатываемая в диссертации оптическая бифотонная спектроскопия является новым методом спектроскопии, обладающим помехоустойчивостью и универсальностью. К тому же создание в России еще одного центра по исследованию и применению бифотонов (наряду с аналогичным центром на физическом факультете Московского государственного университета) будет способствовать развитию этого нового направления квантовой оптики в нашей стране.

Как известно, спектроскопические исследования в различных участках электромагнитного спектра являются одним из наиболее мощных средств изучения строения вещества, поэтому проведенные в данной диссертации экспериментальные исследования являются актуальными.

Цель работы

Целью данной диссертационной работы является экспериментальное исследование новых и развитие известных режимов оптической эхоспектроскопии и бифотонной спектроскопии примесных кристаллов (на примере $Al_2O_3 : Cr^{3+}$ и $YAG:Er^{3+}$).

Научная новизна

1. Впервые экспериментально обнаружена модуляция временной формы первичного фотонного эха в рубине с периодом модуляции в несколько десятков наносекунд. Эксперименты, поставленные на образце рубина, легированном только ионами изотопа $^{53}Cr^{3+}$, дают основание считать, что обнаруженная модуляция формы обязана сверхтонкому взаимодействию валентных электронов ионов изотопа $^{53}Cr^{3+}$ со своим собственным ядром.

2. Впервые поставлены оптические эхо-эксперименты на образце рубина, легированном только ионами изотопа $^{53}Cr^{3+}$, и исследованы сигналы первичного и стимулированного фотонного эха, а также их кривые спада как при наличии слабого магнитного поля, так и в его отсутствие. Из кривых спада эхо-сигнала установлены значения времен фазовой релаксации.

3. Впервые на примере кристалла рубина наблюдается некогерентное фотонное эхо (НФЭ) в условиях, когда один из возбуждающих лазерных импульсов подавался к образцу по оптическому волокну. Изучены особенности спектра сигналов НФЭ в концентрированном рубине и снята кривая спада, с помощью которой получено значение времени фазовой релаксации.

4. Впервые обоснован и экспериментально реализован (на примере кристаллов $Al_2O_3 : Cr^{3+}$ и $YAG:Er^{3+}$) новый способ оптической спектроскопии, использующий частотно-коррелированные пары фотонов, рождающиеся в процессе спонтанного параметрического рассеяния света.

Снятые оптические спектры находятся в полном согласии со спектрами, полученными на обычных спектральных приборах, но в отличие от них обладают высокой помехоустойчивостью.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Кристалл рубина (как с естественным содержанием изотопов хрома, так и специально обогащенный изотопом "хром-53") при температуре жидкого гелия в условиях двухимпульсного резонансного воздействия (на длине волны 693,4 нм) лазера на красителе излучает сигнал первичного фотонного эха, временная форма которого испытывает биения, обязанные сверхтонкому взаимодействию неспаренных электронов ионов хрома $^{53}\text{Cr}^{3+}$ с собственным ядром. Модернизированная установка фотонного эха, включающая в себя лазер на красителе, фотоприемник и стробоскопический осциллограф, позволяет надежно детектировать эхосигналы и биения их формы.

2. Высокообогащенный кристалл рубина при температуре жидкого гелия в условиях резонансного воздействия (на длине волны 693,4 нм) на него двух лазерных импульсов, один из которых был подан к образцу по оптоволокну, излучает (в обращенном режиме) сигнал некогерентного фотонного эха. Созданная экспериментальная установка позволяет исследовать спектр этого эхосигнала и кривую спада, а также определять время фазовой релаксации (98 ± 4 нс).

3. Бифотонная оптическая спектроскопия позволяет получать достоверную информацию о спектрах поглощения (например, $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Cr}^{3+}$ и $\text{YAG}:\text{Er}^{3+}$). Создан бифотонный оптический спектрометр, работающий в режиме счета фотонов, характеризующийся высокой помехоустойчивостью.

Достоверность результатов

Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается надежностью используемых экспериментальных методов, высокой точно-

стью измерений, тщательностью обработки полученных экспериментальных данных, их проверкой другими методами, а также воспроизводимостью получаемых результатов.

Научная и практическая ценность

1. Проведенные исследования вносят существенный научный вклад в развитие оптической эхо-спектроскопии, а полученная информация о времени фазовой релаксации (особенно, в обогащенной рубине) имеет научную ценность.

2. Экспериментальное наблюдение НФЭ с использованием оптического волокна проведено впервые и может представлять практическую ценность при сопряжении оптических эхо-процессоров с оптическими волоконными линиями передачи информации.

3. Бифотонная спектроскопия и аппаратура по ее реализации могут стать основой нового типа помехоустойчивых оптических спектрометров для исследования объектов, "чувствительных" к использованию интенсивного света и "требующих" применения режима счета фотонов.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на конференциях молодых ученых КФТИ КНЦ РАН (Казань, 2003г., 2004г., 2005г., 2006г.), на Всероссийской Школе "Когерентная оптика и оптическая спектроскопия" (Казань, 2003г., 2004г., 2005г., 2006г., 2007г.), на VIII международном симпозиуме по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (Калининград, 2005), на всероссийской конференции "Концепции симметрии и фундаментальных полей в квантовой физике XXI века" (Самара, 2005г.), на международной конференции "Лазерная физика и применение лазеров" (Минск, 2003г.), на Четвертом и Пятом всероссийских семинарах памяти Д.Н.Клышко (Москва, 2005г., 2007г.), на IX и X Международных Чтениях по квантовой оптике (Санкт-Петербург,

2003г., Самара, 2007), на физических семинарах КФТИ КазНЦ РАН и семинарах лаборатории нелинейной оптики этого института.

Тематика диссертации связана с одной из базовых тем КФТИ КазНЦ РАН: "Фундаментальные проблемы функционирования оптической фазовой памяти на основе явлений фотонного эха и сверхизлучения в примесных кристаллах и нанообъектах и разработка оптимальных режимов использования неклассического света в квантовых устройствах". Эти исследования были связаны также с работами по Программам президиума РАН "Квантовая макрофизика" и ОФН РАН "Оптическая спектроскопия и стандарты частоты", по грантам РФФИ №05-02-16169а и №05-02-16003а. Индекс основного направления фундаментальных исследований: 2.3.

Основное содержание диссертации изложено в 24 научных работах, из которых 10 статей опубликованы в рекомендованных ВАК научных журналах.

Личный вклад автора

В большинстве совместных работ автором диссертации выполнена основная экспериментальная часть исследований. Соавторы этих работ помогали с консультациями по теме, участвовали в обсуждении результатов и написании работ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка авторской литературы и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 127 страниц машинописного текста, включая 37 рисунков и список литературных ссылок из 83 наименований. В конце каждой главы даются краткие выводы по изложенным в ней результатам. В заключении сформулированы основные результаты работы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении на основании анализа современного состояния проблемы обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель работы, постановка основных задач, изложены основные защищаемые результаты и положения, их новизна и практическая значимость, структура и содержание диссертации.

В первой главе дается краткий обзор используемых методов исследования. Приведен краткий обзор экспериментов по модуляции временной формы ядерного и спинового эха, и на их примере рассмотрены физические принципы, которым она обязана. На примере кристалла рубина обосновано с использованием сверхтонких взаимодействий неспаренных электронов хрома со своим ядром возникновение модуляции временной формы первичного эха в оптическом диапазоне. Дано объяснение причины того, почему такие биения ранее не наблюдались. Подробно рассмотрены оптические свойства используемых в экспериментах примесных кристаллов: $Al_2O_3 : Cr^{3+}$ и $YAG : Er^{3+}$.

Описана модель некогерентного фотонного эха (НФЭ) и поясняется возможность осуществления в режиме НФЭ фемтосекундной эхоспектроскопии с помощью наносекундной лазерной техники. Показаны преимущества метода НФЭ и приведен краткий обзор экспериментов. В заключении главы рассматривается спонтанное параметрическое рассеяние (СПР) света как метод получения пар коррелированных фотонов. Рассмотрена работа [1], в которой заложены основы спектроскопии парами перепутанных фотонов. В первой главе содержатся только литературные данные, т.е. первая глава является обзорной.

Вторая глава посвящена подробному описанию экспериментальных установок, применяемых методик, а также используемой аппаратуры. Глава состоит из двух параграфов: первый из них посвящен экспериментальной установке, на которой были выполнены все оптические эхо-

эксперименты; во втором параграфе описывается установка предназначенная для бифотонной оптической спектроскопии. В первом параграфе изложены основы метода оптической эхо-спектроскопии. Описана экспериментальная установка по возбуждению как двухимпульсного обращенного фотонного эха (ОФЭ), так и обращенного стимулированного фотонного эха (СФЭ); подробно описаны условия работы и характеристики используемых узлов. Детально рассмотрена используемая линия оптических задержек (ОЛЗ), описаны все режимы её работы и, особенно, получение двух импульсов с возможностью дискретного изменения интервала между ними. Описан оптический квантовый генератор на иттриево-алюминиевом гранате, легированном ионами неодима. Кроме того, здесь обсуждается получение второй гармоники и детально описана работа перестраиваемого лазера на красителе в условиях, когда перестройка длины волны излучения осуществляется голограммной дифракционной решеткой, работающей в скользящем режиме. Кроме этих стандартных узлов, в данной главе подробно описаны применяемые широкополосные осциллографы, которые позволили наблюдать модуляцию формы ОФЭ в рубине с естественным содержанием иона изотопа "хром-53" и значительно облегчить и автоматизировать процесс сбора информации. Во втором параграфе описана экспериментальная установка, которая позволяет проводить исследования спектров поглощения примесных кристаллов в широком диапазоне длин волн. Метод бифотонной спектроскопии основан на явлении спонтанного параметрического рассеяния света, которое, в свою очередь, состоит в когерентном распаде фотонов накачки в нелинейной среде на пары фотонов. Применение данного метода, как будет показано в четвертой главе, позволяет существенно увеличить отношение "сигнал/шум". Большое внимание в данном параграфе уделено описанию процесса детектирования света в режиме счета фотонов и применяемым корреляционным схемам.

В третьей главе, посвященной экспериментальному исследованию

с помощью методов оптической эхо-спектроскопии, изложены результаты эхо-экспериментов, выполненных на рубине. В первом параграфе сообщается об обнаружении в естественном рубине модуляции временной формы сигнала ФЭ с периодом модуляции 37 нс, которую диссертант связывает со сверхтонким взаимодействием валентных электронов ионов изотопа "хром-53" со своим собственным ядром. Это стало возможным благодаря использованию стробоскопического осциллографа с полосой пропускания в несколько гигагерц.

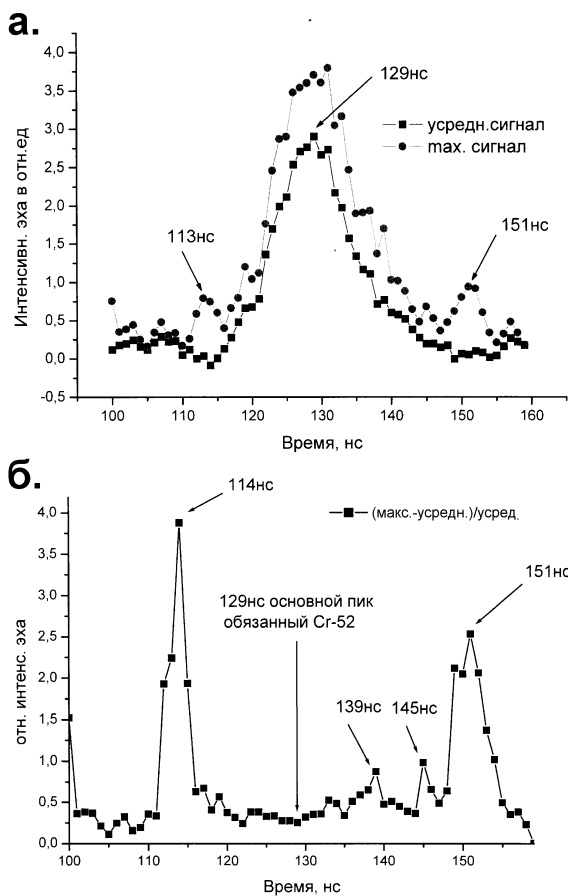


Рис. 1. Временная форма сигнала ПФЭ в естественном рубине (с концентрацией Cr^{3+} , равной 0.1 ат.%) в условиях двухимпульсного широкополосного возбуждения в режиме обращения (а) и результаты статистического анализа биений формы, в которых отброшен вклад в форму ПФЭ четных изотопов хрома (б).

Естественный рубин содержит следующие изотопы хрома: (^{50}Cr – 4,3%; ^{52}Cr – 82,7%; ^{53}Cr – 9,6%; ^{54}Cr – 2,4%). Как известно, только ядро изотопа ^{53}Cr обладает ненулевым ядерным спином (а именно, $3/2$) и, следовательно, именно этот изотоп имеет сверхтонкую структуру электронных уровней. Как видим, процентное содержание этого изотопа в естественном рубине невелико и эхо-сигнал от ионов данного изотопа никак себя не проявлял, тем более, что период модуляции временной формы эхотклика был несколько десятков наносекунд, что в частотной шкале составляет около 50 МГц и никак не могло быть раньше зафиксировано осциллографами типа I2–7.

Результаты нашего эхо-эксперимента приведены на Рис.1 "а", а резуль-

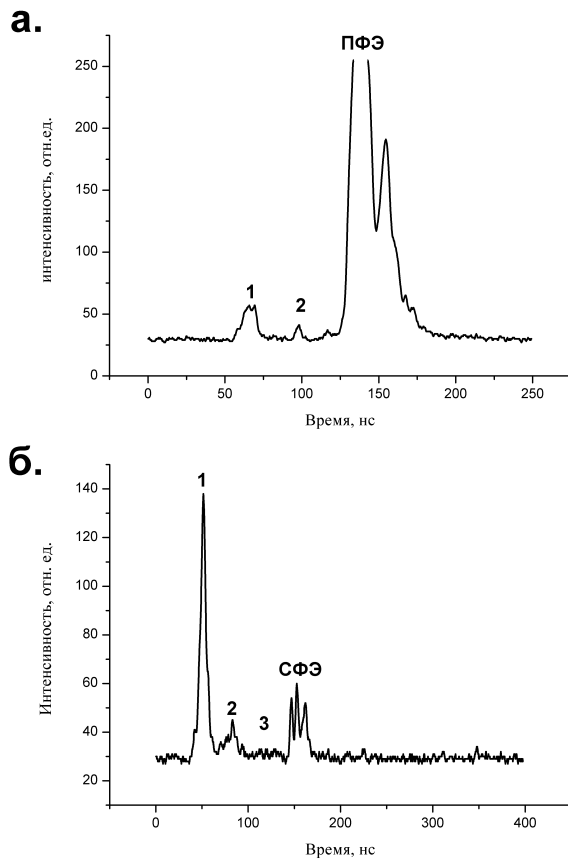
таты статистической обработки показаны на Рис.1 "б". Кроме того, следуя [3], подчеркнем, что модуляция эхо-сигналов и кривых спада обязана анизотропной части сверхтонкого взаимодействия (СТВ) и должна исчезать при таких ориентациях иона в кристалле, когда одна из главных осей тензора СТВ — T_{ik} совпадает с направлением внешнего магнитного поля \vec{H}_o . Это обстоятельство продемонстрировали оптические эхо-эксперименты [4, 5, 6, 15, 8], в которых модуляция наблюдалась лишь при наличии угла Θ (4° или 8°) между \vec{H}_o и оптической осью \vec{C} рубина.

Обратим внимание на то, что, согласно [2], анизотропная часть СТВ (пропорциональная A^2 , т.е. квадрату от константы СТВ) возникает во втором порядке теории возмущений, когда СТВ рассматривается как слабое возмущение к уровням тонкой структуры.

Пренебрежение анизотропным членом приведет к эквидистантному спектру СТВ, переходы между уровнями которого не приведут к модуляции временной формы и кривой спада ФЭ. Учет анизотропной составляющей СТВ (т.е. пропорциональный A^2) приводит к неэквидистантному спектру СТВ и к появлению модуляции ФЭ.

Результаты экспериментов, описанные в данном параграфе,

Рис. 2. Осциллограммы сигналов наблюдаемых в экспериментах по первичному (а) и стимулированному (б) фотонному эхо в обогащенном рубине в слабом продольном магнитном поле. 1,2,3 - ослабленные возбуждающие импульсы.



стимулировали диссертанта к постановке дополнительного эхо-эксперимента на образце, легированном только ионами изотопа ^{53}Cr , в

постоянном магнитном поле. Такие исследования, как показал анализ, проведены впервые.

Поэтому исследования модуляции временной формы ОФЭ и СФЭ на образце рубина, обогащенном ионами изотопа "хром-53", были продолжены и описаны *во втором параграфе*. Результаты этих исследований приведены на Рис.2.

Детальный анализ модуляции формы ПФЭ в естественном рубине показал, что: а) она не может быть объяснена существованием изотопических сдвигов, поскольку их величины составляют десятки гигагерц; б) она не может быть объяснена суперсверхтонким взаимодействием (ССТВ) из-за того, что его частоты составляют примерно единицы мегагерц [9], т.е. на порядок меньше, чем в описанных выше экспериментах; в) она может быть объяснена сверхтонким взаимодействием валентных электронов ионов изотопа ^{53}Cr со своим собственным ядром, поскольку значения сверхтонких расщеплений достигают нескольких десятков мегагерц, а им соответствуют периоды модуляций порядка 20-40 нс, находящиеся в согласии со значениями периодов биений на Рис. 2. Этот изотоп является единственным, у которого ядерный спин не равен нулю ($I=3/2$), причем константа A сверхтонкого взаимодействия ASI (S и I — электронный и ядерный спины) равна 51 мегагерцу.

Поскольку локальное магнитное поле H_l составляет 12 Гс, то помещение образца обогащенного рубина в магнитное поле $H_0 > H_l$ приводит к подавлению спектральной диффузии с характеристическим временем спада, равным 23 нс. В итоге эхо-сигналы в постоянном магнитном поле оказываются более интенсивными. Этот рост интенсивности оказался столь значительным, что авторам данной работы удалось снять кривые спада сигналов ПФЭ и СФЭ в этом образце обогащенного рубина. Они приведены на Рис.3.

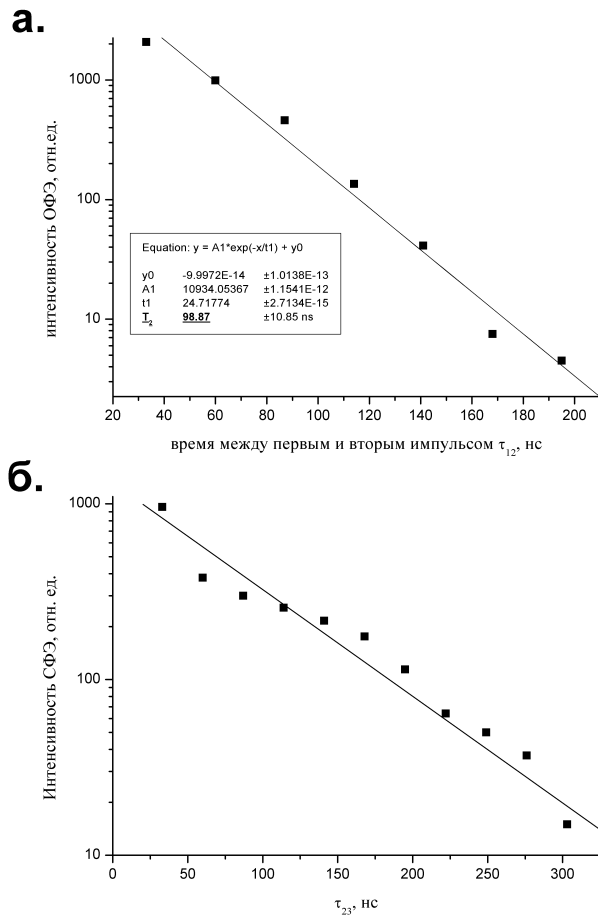


Рис. 3. Кривые спада сигналов первичного (а) и стимулированного (б) фотонного эха в обогащенном рубине в постоянном магнитном поле. Кривая спада (б) снята при фиксированном значении интервала между первыми двумя импульсами ($\tau_{12} = 33 \text{ нс}$). Интервал τ_{23} означает запаздывание третьего импульса относительно второго.

сетка" населенностей, возникающая после первых двух импульсов, будет перенесена на возбужденные сверхтонкие уровни основного (4A_2) состояния и будет там храниться в течение времени жизни этих уровней. Это должно проявиться в зависимости интенсивности стимулированного ФЭ от временного интервала τ_{23} между двумя последними импульсами, которая в случае формирования ДФЭ обычно состоит из двух частей: быстрого спада (из верхнего на метастабильный уровень) и более медленного спада (из метастабильного на основной уровень) [11]. Отметим, что исследование сигналов ФЭ (и, тем более, поиск сигнала ДФЭ) в рубине,

Наблюдаемые биения этих кривых с периодом около 130 нс, скорее всего, связаны с суперсверхтонким взаимодействием валентных электронов ионов хрома с ядрами алюминия, поскольку оценка параметра этого взаимодействия дает единицы мегагерц. Анализ кривой спада интенсивности ПФЭ от τ_{12} показал, что значение времени фазовой релаксации равно $T_2 = 98 \text{ нс}$.

Продолжением этих исследований стало изучение кинетики спада стимулированного ФЭ в кристалле рубина, обогащенном ионами изотопа "хром-53", в нулевом магнитном поле с целью поиска долгоживущего фотонного эха (ДФЭ). В соответствии с [10] предполагается, что неравновесная "ре-

обогащенном только ионами изотопа "хром-53", проводится впервые.

В отличие от исследований, описанных в начале параграфа, данные исследования проводились в нулевом магнитном поле, однако это не означает отсутствие магнитного поля на ядрах хрома. В местоположении каждого примесного центра существует локальное магнитное поле \vec{H}_l , обязанное суперсверхтонкому взаимодействию (ССТВ) валентных электронов хрома с ядрами алюминия [12]. Средняя величина этого поля составляет 12 Гс при хаотическом распределении направлений этих полей в пространстве. При этом важно помнить, что в рубине на энергетическом переходе ${}^4A_2 - 2E(\bar{E})$ g-факторы спектроскопического расщепления основного 4A_2 и возбужденного $2E(\bar{E})$ состояний различны как по величине, так и по степени анизотропии: $g_{\parallel,\perp}({}^4A_2) = 1,99$ (т.е. изотропен) и $g_{\parallel}(2E(\bar{E})) = 2,44$ и $g_{\perp}(2E(\bar{E})) \leq 0,1$ (т.е. сильно анизотропен), где значки " \parallel -параллельно" и " \perp -перпендикулярно" поясняют направление относительно оптической оси. Поэтому магнитные моменты ионов хрома в основном состоянии (4A_2) будут направлены, как правило, вдоль локальных магнитных полей, т.е. хаотично, в то время как магнитные моменты ионов хрома в возбужденном ($2E(\bar{E})$) состоянии будут направлены, в основном, вдоль оптической оси кристалла.

В данном эхо-эксперименте была снята зависимость интенсивности стимулированного фотонного эха от временного интервала τ_{23} при фиксированном значении интервала τ_{12} . Она приведена на Рис. 4, на котором четко виден "излом" кривой спада при значении $\tau_{23} = 168$ нс. Такой "излом" является характерным признаком наблюдения именно сигнала ДФЭ [11]. Кроме того, более быстрый спад в логарифмической шкале имеет вид кривой и не может быть описан обычной экспоненциальной функцией спада. Анализ этого спада позволил найти время продольной релаксации на переходе из возбужденного $2E(\bar{E})$ - состояния на возбужденный сверхтонкий подуровень основного 4A_2 состояния: 1.46×10^{-7} с.

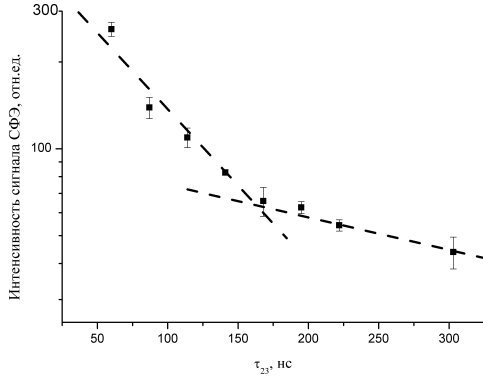


Рис. 4. Зависимость относительной интенсивности стимулированного ФЭ в обогащенном (изотопом "Cr-53") рубине от интервала τ_{23} между вторым и третьим импульсами при фиксированном значении интервала $\tau_{12} = 33$ нс.

Характеристическое время более протяженного спада на Рис. 4 примерно в 4.5 раза длиннее (6.46×10^{-7} с.) и, в принципе, определяется временем жизни возбужденных сверхтонких подуровней 4A_2 -состояния. Тот экспериментальный факт, что оно короче времени жизни сверхтонких подуровней, полученного в нулевом магнитном поле в работе [14], свидетельствует о существовании спектральной диффузии, обязанной кросс-

релаксации на сверхтонких переходах основного состояния (как в работе [13]). Это приводит к тому, что время хранения неравновесной электронной плотности на возбужденных сверхтонких подуровнях короче времени жизни возбужденного $2E(\bar{E})$ -состояния и потому наблюдаемый сигнал СФЭ не может быть отнесен к разряду долгоживущих.

Третий параграф посвящен наблюдению и исследованию некогерентного фотонного эха в условиях, когда первый возбуждающий импульс подводится к исследуемому образцу через оптическое волокно. Были получены осциллограммы НФЭ, сняты спектры НФЭ, а также исследована кривая временного спада НФЭ (т.е. зависимости его интенсивности от интервала τ_{12} между импульсами). К сожалению, из-за слабости сигнала НФЭ и большого шага ОЛЗ нам удалось снять лишь три точки на кривой спада. Тем не менее этого было достаточно, чтобы получить значение времени фазовой релаксации: $T_2 = 98 \pm 4$ нс. Анализ показал, что, скорее всего, она обязана процессу спектральной диффузии [15].

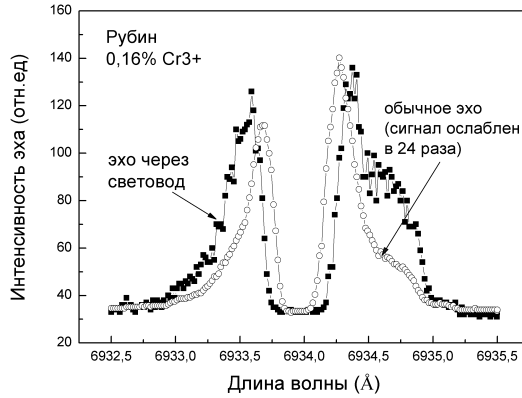


Рис. 5. Зависимость относительной интенсивности обращенного НФЭ в высококонцентрированном рубине ($C=0,16$ ат.%) от длины волны на фоне спектра ослабленного в 24 раза сигнала обычного обращенного ФЭ (т.е. без использования оптоволокну). Время задержки второго импульса относительно первого — $t_{12}=18$ нс.

Кроме того, интерес представляют результаты исследования спектра НФЭ в сравнении со спектром обычного обращенного фотонного эха (ослабленного в 24 раза). Четко виден "провал" в спектрах, объясненный тому обстоятельству, что энергия второго импульса в ходе формирования стоячей волны практически полностью поглощается ионами хрома в центре R_1 -линии, причем настолько, что второй импульс и, тем более, эхо-сигнал не могут

"выбраться" из образца. Для обоих спектров характерен центральный "провал" разной спектральной ширины, что может быть обязано малой мощности сигнала НФЭ. Однако крылья спектров существенно отличаются. Физические причины уширения спектра НФЭ скорее всего кроются в спектральных свойствах оптоволокну. Это обстоятельство может быть использовано в прикладных целях, например, для проверки качества оптоволокну в требуемых диапазонах длин волн.

Четвертая глава посвящена бифотонной оптической спектроскопии примесных кристаллов.

В первом параграфе описаны теоретические основы бифотонной спектроскопии. Бифотонная оптическая спектроскопия основана на явлении спонтанного параметрического рассеяния (СПР) света в нелинейной среде, а именно, на свойствах пары фотонов, рожденных в процессе СПР.

Фотоны в паре коррелируют по моменту рождения (в течение времени когерентности) и по частоте (в соответствии с законом сохранения энергии $\hbar\omega_0 = \hbar\omega_1 + \hbar\omega_2$, где ω_0 — частота фото-

на накачки, ω_1, ω_2 — частоты сигнального и холостого фотонов).

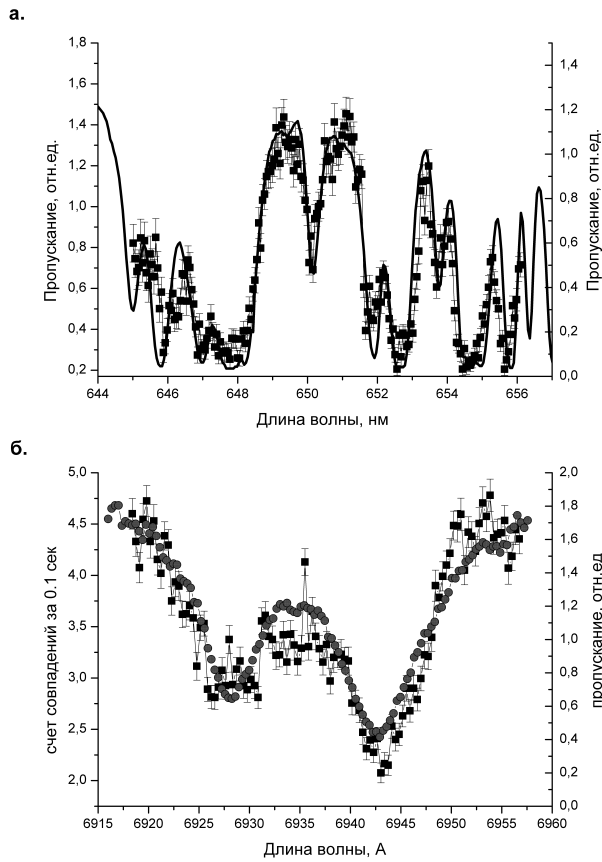


Рис. 6. Спектры поглощения (а) YAG:Er³⁺ снятый методом лазерной спектроскопии (сплошная линия) и методом бифотонной спектроскопии ■; (б) рубина снятый методом лазерной спектроскопии • и методом бифотонной спектроскопии ■.

Бифотонная спектроскопия примесных кристаллов реализуется в условиях, когда частоты фотонов в паре не попадают в область сильного фононного поглощения, но зато попадают в полосу оптического поглощения примесных центров в исследуемом образце. В результате поглощение одного из фотонов в паре сказывается на счете совпадений (уменьшение счета совпадений можно интерпретировать как поглощение сигнальных фотонов образцом).

Во втором параграфе экспериментально продемонстрированы возможности бифотонной спектроскопии. Снятый в технике бифотонной спектроскопии спектр поглощения ИАГ, легированного эрбием, демонстрирует все детали, как у спектра, полученного на обычном спектрометре. Эти спектры приведены на Рис. 6 а. Следует отметить, что спектр поглощения эрбия снимался в условиях коллинеарного вырожденного синхронизма. Ширина спектра СПР в таких условиях достигает 20 нм, что позволяет проводить спектроскопические исследования в этом диапазоне посредством только монохроматора.

Кроме того, в этом параграфе продемонстрировано, что бифотонная оптическая спектроскопия позволяет получать не только детальные спектры, но и проявляет устой-

Кроме того, в этом параграфе продемонстрировано, что бифотонная оптическая спектроскопия позволяет получать не только детальные спектры, но и проявляет устой-

чивость этого метода измерений к шумам детекторов.

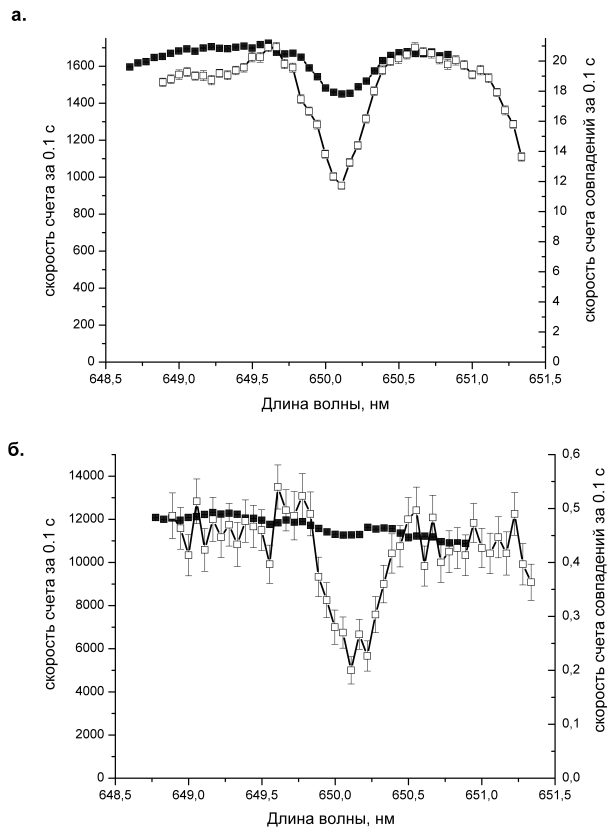


Рис. 7. Спектр поглощения YAG:Er^{3+} , полученный методом традиционной спектроскопии и методом бифотонной спектроскопии в условиях, когда шум превышает сигнал в 2 раза (а) и когда шум превышает сигнал в 30 раз (б).

На Рис. 7 "а" приведены спектры, полученные двумя методами при одинаковом отношении "сигнал/шум", равном $1/2$. А на Рис. 7 "б" отношение "сигнал/шум" еще уменьшено в 15 раз и составляет $1/30$. Видно, что с ростом уровня шумов спектр, снятый методом бифотонной спектроскопии, почти не изменился, а спектр, снятый обычным методом, практически исчез.

В третьем параграфе продемонстрированы возможности бифотонной спектроскопии в условиях невырожденного синхронизма. Результаты исследований приведены на Рис. 6 "б".

Основные результаты, полученные в диссертации

1. Обнаружена модулированная временная форма сигнала обращенного фотонного эха в рубине, обязанная СТВ неспаренных электронов ионов изотопа "хром-53" со своим собственным ядерным спином. В процессе проверки физических причин модуляции впервые был поставлен успешный эхо-эксперимент на образце корунда, обогащенном ионами изотопа "хром-53", и снята кривая спада, позволившая определить время фазовой релаксации (98 нс). Эти эксперименты стали возможными благодаря использованию широкополосной, высокочувствительной и автоматизированной аппаратуры.

2. Обнаружено и детально исследовано явление некогерентного фотонного эха в рубине в условиях подачи первого возбуждающего импульса к образцу по оптическому волокну. Широкополосность возбуждения использовалась за счет использования лазера на красителе и за счет самомодуляции и уширения спектра первого импульса в оптоволокне. Снята кривая спада интенсивности эхо-сигнала, из анализа которой оценено время фазовой релаксации (98 нс). Этот эхо-эксперимент имеет также и практическое значение для сопряжения оптических эхо-процессоров с оптоволоконными сетями.

3. Развита метод бифотонной оптической спектроскопии примесных кристаллов и впервые на примере кристалла YAG:Er^{3+} продемонстрирована высокая помехоустойчивость снятых оптических спектров поглощения по сравнению с методами традиционной оптической спектроскопии. По сравнению с предшествующим экспериментом японских исследователей Ябушита и Кабаями [16], проведенное в данной диссертации исследование отличается от него высокой точностью, малым разбросом экспериментальных точек и воспроизводимостью тонких деталей спектра. Изучены вырожденный (на YAG:Er^{3+}) и невырожденный (на $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Cr}^{3+}$) режимы бифотонной спектроскопии.

Выводы из результатов диссертации

1. На основании экспериментального анализа временной формы сигнала ОФЭ (в естественном рубине и легированном только ионами изотопа "хром-53") установлено, что она испытывает биения, период которых соответствует частоте сверхтонкого взаимодействия валентных электронов $^{53}\text{Cr}^{3+}$ со своим собственным ядром. Это позволяет находить значения этих частот (так, периоду биений 37 нс соответствует частота сверхтонкого взаимодействия $\nu=27$ МГц)

2. Использование оптических волокон в оптических эхо-экспериментах, хотя и создает технические трудности при вводе

лазерных импульсов в исследуемый образец, но все же позволяет получать надежные эхо-сигналы и измерять их кривые спада. Это дает возможность в дальнейшем осуществлять сопряжение оптических эхо-процессоров с оптоволоконными линиями передачи информации, а также с волоконными оптическими головками считывания [17].

3. В данной диссертации осуществлено становление нового метода оптической спектроскопии примесных кристаллов — бифотонной спектроскопии, обладающей высокой помехоустойчивостью. Поскольку детектирование оптических спектров в данном методе проводится в режиме счета одиночных фотонов, то он может оказаться ценным для спектроскопического исследования биологических объектов, весьма чувствительных к воздействию интенсивного света.

Список авторской литературы

- [A1] **Shkalikov, A.V.** Detection of satellites of primary photon echo in ruby / V.V. Samartsev, A.M. Shegeda, A.V. Shkalikov, V.A. Zuikov. // Laser Physics. -2003. -V.13. -P.147-149.
- [A2] **Шкаликов, А.В.** Оптическая спектроскопия с помощью бифотонов / А.А. Калачев, А.А.Калинкин, В.В. Самарцев, А.В. Шкаликов. // Известия РАН сер.физ. -2006. -Т.70. -С. 480-483.
- [A3] **Shkalikov, A.V.** Incoherent backward photon echo in ruby upon excitation through an optical fiber / V.V. Samartsev, A.M. Shegeda, A.V. Shkalikov, K.R. Karimullin, T.G. Mitrofanova, and V.A. Zuikov. // Laser Physics Letters. -2007. -V.4, №7. -P.534-537.
- [A4] **Shkalikov, A.V.** Biphoton spectroscopy of $YAG : Er^{3+}$ crystal / A.A. Kalachev, D.A. Kalashnikov, A.A. Kalinkin, T.G. Mitrofanova, V.V. Samartsev, A.V. Shkalikov. // Laser Physics Letters. -2007. -V.4, №10. -P. 722-725.

- [A5] **Шкаликов, А.В.** Квантовая спектроскопия с помощью частотно коррелированных пар фотонов / А.А.Калачев, Д.А.Калашников, А.А.Калинкин, В.В.Самарцев, А.В.Шкаликов. // Ученые записки КГУ, физ.-мат.науки. -2007. -Т.149, кн.1. -С.58-63.
- [A6] **Шкаликов, А.В.** Некогерентное фотонное эхо в рубине в условиях транспортировки возбуждающих импульсов по оптоволокну / В.А.Зуйков, К.Р.Каримуллин, Т.Г.Митрофанова, В.В.Самарцев, А.М.Шегеда, А.В.Шкаликов. // Ученые записки КГУ, физ.-мат.науки. -2007. -Т.149, кн.1. -С.41-50.
- [A7] **Шкаликов, А.В.** Особенности кинетики спада интенсивности стимулированного фотонного эха в рубине, обогащенном только ионами изотопа "хром-53"/ В.В. Самарцев, А.М. Шегеда и А.В. Шкаликов. // Ученые записки КГУ, физ.-мат.науки. -2008. -Т.150, кн.1. (В печати)
- [A8] **Шкаликов, А.В.** Обязанная сверхтонкому взаимодействию модуляции формы сигналов первичного и стимулированного фотонного эха в рубине в постоянном магнитном поле / В.В. Самарцев, А.М. Шегеда, А.В. Шкаликов, В.А. Зуйков, И.З. Латыпов и Т.Г. Митрофанова. // Ученые записки КГУ, физ.-мат.науки. -2008. -Т.150, кн.1. (В печати)
- [A9] **Шкаликов, А.В.** Поисковые исследования сателлитов первичного фотонного эха в рубине / В.В. Самарцев, А.М. Шегеда, А.В. Шкаликов, В.А. Зуйков. // VI Молодежная Научная Школа "Когерентная оптика и оптическая спектроскопия": сб. науч. тр./ Казань. Гос. ун-т. -2002. -С.305-310.
- [A10] **Шкаликов, А.В.** Экспериментальная установка для исследования интерференции четвертого порядка между независимыми бифотонами / А.В. Шкаликов. // VII Молодежная Научная Школа "Ко-

герентная оптика и оптическая спектроскопия": сб. науч. тр./ Казань. Гос. ун-т. -2003. -С.391-395.

- [A11] **Шкаликов, А.В.** Сателлиты первичного фотонного эха в рубине / В.А.Зуйков, В.В.Самарцев, А.М.Шегеда, А.В.Шкаликов. // Конференция молодых ученых КФТИ КНЦ РАН: сб. науч. тр. под ред. С.В.Петрушкина и А.Р.Мурсалимова / Казань. КФТИ КНЦ РАН. -2003. -С.44-51.
- [A12] **Шкаликов, А.В.** Обнаружение сателлитов первичного фотонного эха в рубине / В.В. Самарцев, А.М. Шегеда, А.В. Шкаликов, В.А. Зуйков. // в кн.: Лазерная физика и применение лазеров (Материалы международной конференции под ред. Н.С.Казака) / Минск. ИФ НАНБ, -2003. -С.147-149.
- [A13] **Shkalikov, A.V.** Experimental discovery of the primary photon echo's satellites in ruby / V.V. Samartsev, A.M. Shegeda, A.V. Shkalikov, V.A. Zuikov. // In: Book of abstracts of 12-th International Laser Physics Workshop Hamburg: Germany, August 25-29,2003)/ Hamburg. DFG-institute. -2003. -P.43.
- [A14] **Шкаликов, А.В.** Особенности детектирования бифотонных полей при спонтанном параметрическом рассеянии света / А.В.Шкаликов, Д.А.Калашников, А.А.Калинкин, В.В.Самарцев. // Конференция молодых ученых КФТИ КНЦ РАН: сб. науч. тр. под ред. С.В.Петрушкина и А.Р.Мурсалимова / Казань. КФТИ КНЦ РАН. -2004. -С.88-94.
- [A15] **Шкаликов, А.В.** Световое (фотонное) эхо в рубине:современное состояние исследований в казанском физико-техническом институте РАН и обнаружение сателлитов первичного эха / В.В. Самарцев, А.М. Шегеда, А.В. Шкаликов, В.А. Зуйков. // В сб. "Нелинейные

динамические процессы"/Владивосток. Дальнаука. -2004. -С.130-140.

- [A16] **Шкаликов, А.В.** Спектроскопия в режиме счета фотонов / А.В.Шкаликов, А.А.Калинкин, Д.А.Калашников, А.А.Калачев, В.В.Самарцев. // Конференция "Концепции симметрии и фундаментальных полей в квантовой физике XXI века"/ Самара. СамГУ. -2005. -С.101-102.
- [A17] **Шкаликов, А.В.** Использование лавинных фотодиодов для детектирования бифотонов / А.В.Шкаликов, Д.А.Калашников, А.А.Калинкин, В.В.Самарцев. // Конференция молодых ученых КФТИ КНЦ РАН: сб. науч. тр. под ред. А.Р.Мурсалимова и С.М.Хантимерова / Казань. КФТИ КНЦ РАН. -2006. -С.63-67.
- [A18] **Шкаликов, А.В.** К вопросу о распространении импульсов малой площади через оптически плотные среды / А.В.Шкаликов, А.А.Калинкин, А.А.Калачев, В.В.Самарцев. // В сб. X Молодежная Научная Школа "Когерентная оптика и оптическая спектроскопия"/ Казань. КГУ. -2006. -С.181-184.
- [A19] **Shkalikov, A.V.** Optical spectroscopy using biphotons / A.A. Kalachev, A.A. Kalinkin, V.V. Samartsev, A.V. Shkalikov. // Proceedings of SPIE (ed. by V.V.Samartsev) / -2006. -V.6181. -P. 618109.
- [A20] **Шкаликов, А.В.** Генерация узкополосных бифотонов в оптическом параметрическом осцилляторе / А.А.Калачев, Д.А.Калашников, А.А.Калинкин, В.В.Самарцев, Ю.З.Фаттахова, А.В.Шкаликов. // В кн. "Когерентная оптика и оптическая спектроскопия" сб. науч. тр. под ред. М.Х.Салахова и В.В.Самарцева. / Казань. КГУ. -2007. -С.134-137.

- [A21] **Шкаликов, А.В.** О возможности детектирования сверхтонкой структуры ионов "хром-53" в рубине на временной форме сигнала фотонного эха / И.З.Латыпов, Т.Г.Митрофанова, К.Р.Каримуллин, В.А.Зуйков, А.В.Шкаликов, А.М.Шегеда, В.В.Самарцев. // В кн. "Когерентная оптика и оптическая спектроскопия" сб. науч. тр. под ред. М.Х.Салахова и В.В.Самарцева. / Казань. КГУ. -2007. -С.151-154.
- [A22] **Shkalikov, A.V.** Modulation of a photon echo form of trivalent ions "Cr-53" / I.Z.Latypov, T.G.Mitrofanova, V.V.Samartsev, A.M.Shegeda, A.V.Shkalikov. // Proceedings of SPIE (ed. by V.V.Samartsev) / -2008. -V.7204.
- [A23] **Шкаликов, А.В.** Бифотонная спектроскопия кристалла рубина / А.А. Калачев, Д.А. Калашников, А.А. Калинин, Т.Г. Митрофанова, В.В. Самарцев, А.В. Шкаликов. // Ученые записки КГУ, физ.-мат.науки. -2008. -Т.150, кн.1. (В печати)
- [A24] **Shkalikov, A.V.** Photon echo in ruby doped only by ^{53}Cr isotope ions / V.V. Samartsev, A.M. Shegeda, A.V. Shkalikov, T.G. Mitrofanova. // Laser Physics Letters. -2008. -V.5. DOI 10.1002/lapl. 200810037(In print)

Список цитированной литературы

- [1] **Scarcelli, G.** Remote spectral measurement using entangled photons / G.Scarcelli, A.Valencia, S.Gompers, Y.Shih. // Arxiv:quant-ph/0407164v1 -2004.
- [2] **Карлов, Н.В.** Квантовые усилители / Н.В.Карлов, А.А.Маненков. // (серия: Итоги науки) -М.:ВИНИТИ, -1966. -334 с.

- [3] **Салихов, К.М.** Электронное спиновое эхо и его применение / К.М.Салихов, А.Г.Семенов, Ю.Д.Цветков. -Новосибирск:Наука, - 1976. -342 с.
- [4] **Abella, I.D.** Modulation and fast decay of photon-echos in ruby / I.D.Abella, L.Q.Lambert, A.Compaan. // Phys.Lett. -1969. -V.30, №3. P.153-154.
- [5] **Abella, I.D.** Observation of superhiperfine modulation and quantumn beats in photon-echo spectroscopy in ruby / I.D.Abella, A.Compaan, L.Q.Lambert. // In: Proc. of laser spectroscopy conference. Vail(Col):USA,1974. -P. 3-15.
- [6] **Grishkovsky, D.** Electron spin- and photon-echo behavior in high field / D.Grishkovsky, S.R.Hartman. // Phys.Rev. -1970. -V.2. -№1. P.60-76.
- [7] **Liao, P.F.** Photon echo nuclear double resonance and its aplication in ruby / P.F.Liao, P.Hu, R.Leigh, S.R.Hartmann. // Phys.Rev.A - Gen.Phys. -1974. -V.9, №1, -P.332-340.
- [8] **Samartsev V.V.** Some experimental peculiarities of photon echo in ruby / V.V. Samartsev, A.A. Kalachev, R.G. Usmanov // Proc SPIE. ed. A.A.Kaplyanshii, B.B. Malkin, S.I. Nikitin -2002. -V.4766. -P.228-232.
- [9] **Манькин, Э.А.** Оптическая эхо-спектроскопия / Э.А.Манькин, В.В.Самарцев. -М.:Наука, 1984. -270 с.
- [10] **Голенищев-Кутузов, В.А.** Импульсная оптическая и акустическая когерентная спектроскопия. /В.А.Голенищев-Кутузов, В.В.Самарцев, Б.М.Хабибуллин. -М:Наука. -1988. -224 с.
- [11] **Ахмедиев Н.Н.** Долгоживущее оптическое эхо и оптическая память // В кн.: Новые физические принципы оптической обработки

информации / под ред. С.А. Ахманова, М.А. Воронцова / Н.Н. Ахмедиев, В.В. Самарцев – 1990. – С. 326–359.

- [12] **Laurence N.** Aluminium hyperfine interaction in ruby / N. Laurence, E.C. McIrvine, J. Lembe // J.Chem. Phys. Solids. – 1963. – V. 7. – P. 515–531.
- [13] **Manenkov A.A.** Concentration and temperature dependences of spin-lattice relaxation times in ruby at helium temperatures: relaxation in a zero magnetic field / A.A. Manenkov, U.K. Danileiko // IEEE J. of Quant. Elec. – 1966. – V. QE-2. – P. 409–412.
- [14] **Nakanishi S.** Observation of various photon echoes and FID in ruby by Stark switching technique / S. Nakanishi, O. Tamura, T. Muramoto, T. Hashi // J. Phys. Soc. Japan. – 1978. – V. 452. – P. 1437–1438.
- [15] **Liao, P.F.** Photon echo nuclear double resonance and its application in ruby / P.F.Liao, P.Hu, R.Leigh, S.R.Hartman. // Phys.Rev.A - Gen.Phys. -1974. -V.9, -№1, -P.332-340.
- [16] **Yabushita, A.** Spectroscopy by frequency-entangled photon pairs / A. Yabushita, T. Kobayashi. // Phys. Rev. A. -2004. -V.69. -P.013806[4 pages].
- [17] **Андрианов, С.Н.** Волоконно оптические системы оптического зрения для применения в науке, промышленности и делопроизводстве / С.Н. Андрианов, В.А. Зуйков, А.А. Калачев, В.С. Максимюк, С.О. Мирумянц, В.В. Самарцев, Л.А. Трофанчук, А.М. Шегеда. // Изв. РАН, Серия физическая. -2002. -Т.66, №3. -С.369-372.